



## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ

И. С. Клименко, д. ф. - м. н., Российский новый университет, [rosnou.ru](http://rosnou.ru), Москва

Образование спекл-полей неизбежно сопровождается практические решения в области когерентной, нелинейной и атмосферной оптики, голографии и обращения волнового фронта, голографической и спекл-интерферометрии, применения многомодовых волоконно-оптических систем. Только зеркальное отражение и пропускание лазерного излучения сквозь однородно прозрачные для него объекты не приводит к проявлению этого эффекта. Спекл-поля несут важную измерительную информацию об исследуемых объектах. Представлен обзор развития исследований феномена образования спекл-полей и процессов их когерентного взаимодействия.

### ВВЕДЕНИЕ

Принцип голографии был открыт Д. Габором в 1947 году [1] еще до изобретения лазера. Позже, в 1962 году, он был обобщен Ю. Н. Денисюком как явление отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения [2]. Использование Э. Лейтом и Дж. Упатниексом в 1963 году гелий-неонового лазера [3] позволило в полной мере продемонстрировать замечательные свойства голографических изображений. Буквально сразу же после этого оптическая голография начала бурно развиваться.

Однако тут же возникла проблема, имеющая фундаментальное основание, – в изображениях всегда появлялась так называемая лазерная пятнистость. Этот неустранимый шум получил название спекл-шума (от английского speckle – зерно, пятно). Исследования показали, что такой шум вызван использованием диффузно рассеянного когерентного излучения. Причиной появления спекл-структуры становится неизбежная пространственная модуляция световых полей из-за перекрестной интерференции множества компонентов излучения.

Традиционный метод голографии основан на регистрации рассеянного объектом светового поля в присутствии наклонной (внеосевой) опорной волны. При восстановлении в нулевом максимуме дифракции возникает диффузно рассеянный фон – как следствие дифракции освещающего пучка на зарегистрированной голограммой спекл-

## INTERFERENCE OF SPECKLE FIELDS

I. S. Klimenko, Doctor of Sc. (Phys. and Math.), Russian New University, [en.rosnou.ru](http://en.rosnou.ru), Moscow

The formation of speckle fields inevitably accompanies practical solutions in the field of coherent, nonlinear and atmospheric optics, holography and phase conjugation, holographic and speckle interferometry, and the use of multimode fiber-optical systems. The specular reflection and transmission of laser radiation through uniformly transparent objects alone does not lead to the manifestation of this effect. Speckle fields carry important measurement information about the objects under study. The review of the development of studies of the phenomenon of speckle fields formation and the processes of their coherent interaction is given.

### INTRODUCTION

The principle of holography was discovered by D. Gabor in 1947 [1] even before the invention of the laser. Later, in 1962, it was generalized by Y. N. Denisyuk as a phenomenon of mapping the optical properties of an object in the wave field of the scattered radiation [2]. The use of Helium-Neon laser [3] by E. Leith and J. Upatnieks in 1963 made it possible to fully demonstrate the remarkable properties of holographic images. Literally, optical holography began to develop rapidly immediately after this.

However, there was also a problem that has a fundamental basis – there always appeared the so-called laser spotting in the images. This unremovable noise was called speckle noise ("speckle" – grain, spot). The studies have shown that such noise is caused by the use of diffusely scattered coherent radiation. The reason for the appearance of the speckle structure is the inevitable spatial modulation of the light fields due to the cross-interference of a set of radiation components.

The traditional method of holography is based on recording the light field scattered by the object in the presence of an oblique (off-axis) reference wave. When the diffraction is restored at the zero maximum, a diffusely scattered background arises as a consequence of the diffraction of the illuminating beam on the speckle structure registered by the hologram. For some time, it was believed that this component of the field diffracted on the hologram did not carry useful information.



структуре. Некоторое время считалось, что эта составляющая дифрагированного на голограмме поля не несет полезной информации.

Однако как показали исследования в области голографии сфокусированных изображений [4,5], внешне хаотичная структура спекл-поля способна нести существенную информацию об исследуемых объектах. В работах [6,7] разными группами исследователей независимо друг от друга был обнаружен эффект формирования голограммами, полученными в диффузно рассеянном излучении, сфокусированных изображений осевых реконструкций. Реконструированные изображения обладали рядом любопытных свойств. Важным следствием применимости при голографической регистрации сфокусированных изображений опорных волн произвольной формы, в том числе диффузно рассеянных [8-10], в частности сформированных из рассеянного объектом излучения [11], оказалась возможность своеобразного вырождения опорной волны. Его смысл заключается в том, что в диффузно рассеянном когерентном излучении сфокусированные изображения регистрируют без специально формируемого опорного пучка. Природа таких изображений, не зависящих от наличия опорной волны, была в дальнейшем исследована и объяснена в работах [12,13].

Зарегистрированный приемником результат интерференции составляющих диффузно рассеянного поля (спекл-структура) представляет собой низкочастотную пространственную несущую волну. Она необходима для формирования вблизи оси освещающего пучка изображений, обнаруженных рядом исследователей [6,7]. Это явление лежит в основе физического механизма спекл-фотографии и спекл-интерферометрии.

### ФЕНОМЕН СПЕКЛ-ПОЛЯ

Практическое использование лазерного излучения сопровождается образованием световых полей, обладающих сложной пространственной структурой случайного характера. Такие поля, получившие название спекл-полей, самопроизвольно возникают при рассеянии когерентного излучения любыми шероховатыми или существенно неровными поверхностями, а также объектами с нерегулярным амплитудным или фазовым профилем. Поэтому только зеркальное отражение и пропускание лазерного излучения сквозь однородно прозрачные для него объекты не сопровождается образованием спекл-полей.

Случайная пространственная модуляция амплитуды и фазы спекл-полей является результа-

However, as the studies in the field of holography of focused images have shown [4, 5], the outwardly chaotic structure of the speckle field is capable of carrying essential information about the investigated objects. In [6, 7], the different groups of researchers, independently of each other, revealed the effect of the formation of focused images of axial reconstructions by holograms obtained in diffusely scattered radiation. The reconstructed images had a number of curious properties. An important consequence of the applicability of holographic recording of the focused images of reference waves of arbitrary shape, including those diffusely scattered [8-10], in particular formed from the radiation scattered by the object [11], was the possibility of a peculiar degeneration of the reference wave. Its meaning lies in the fact that in diffuse-scattered coherent radiation, the focused images are recorded without a specially formed reference beam. The nature of such images, independent of the presence of a reference wave, was subsequently investigated and explained in [12, 13].

The result of the components interference of the diffusely scattered field (speckle structure) registered by the receiver is a low-frequency spatial carrier wave. It is necessary for the formation near the axis of the illuminating beam of the images found in [6, 7] and constituting the physical mechanism of speckle photography and speckle interferometry.

### SPECKLE FIELD PHENOMENON

The practical use of laser radiation is accompanied by the formation of light fields that have a complex random spatial structure. Such fields, i.e. speckle fields, spontaneously arise when coherent radiation is scattered by any rough or essentially uneven surfaces, and also objects with an irregular amplitude or phase profile. Therefore, only specular reflection and transmission of laser radiation through objects that are uniformly transparent are not accompanied by the formation of speckle fields.

The random spatial modulation of the amplitude and phase of the speckle fields is the result of the coherent addition of independent contributions from various local sections (points) of the scattering surface or a volume partially illuminated by coherent radiation. In this case, for objects of any form, these contributions have random phase values that are different for different points in the speckle-field volume (Fig. 1).

The formation of speckle fields inevitably accompanies the solution of practical problems of coherent, nonlinear and atmospheric optics, holography and phase conjugation, holographic and speckle interferometry, and the use of multimode fiber-optical

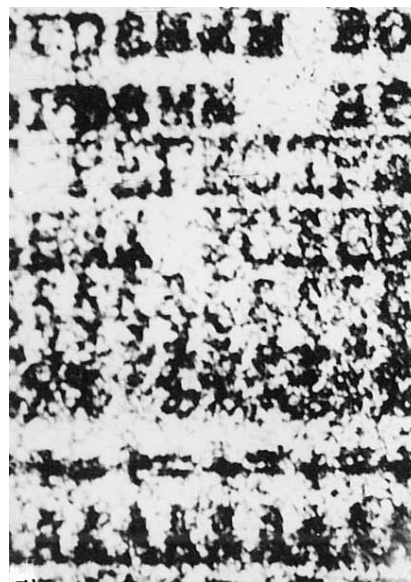
том когерентного сложения независимых вкладов от различных локальных участков (точек) рассеивающей поверхности или объема, освещенных частично когерентным излучением. При этом для объектов любой формы эти вклады имеют случайные значения фазы, различные для разных точек объема спекл-поля (рис. 1).

Образования спекл-полей неизбежным образом сопровождается решение практических задач когерентной, нелинейной и атмосферной оптики, голографии и обращения волнового фронта, голографической и спекл-интерферометрии, применения многомодовых волоконно-оптических систем. При этом они порождают характерную зернистую структуру, которая накладывается на получаемые изображения, становясь источником спекл-шума.

Однако, с другой стороны, в спекл-интерферометрии, ставшей широко распространенным и весьма эффективным методом оптических измерений, спекл-поле целенаправленно используется в качестве носителя информации о смещении и/или формоизменении исследуемого объекта.

Интерес к исследованию природы спекл-полей обусловлен двумя обстоятельствами. С одной стороны, потребностями практики, поскольку интерференция спекл-полей представляет собой физический механизм голографической и спекл-интерферометрии. К тому же во многих практических задачах когерентной оптики имеет место суперпозиция спекл-поля либо с гладким полем, либо с другим спекл-полем. С другой стороны, своеобразие корреляционных свойств спекл-полей обуславливает проявление при их суперпозиции многих своеобразных интерференционных эффектов, что определяет целесообразность рассмотрения интерференции спекл-полей в качестве полноценного самостоятельного раздела теории частичной когерентности.

После появления первых работ в области прикладной спекл-интерферометрии [14–16] основное внимание исследователей и инженеров оказалось направленным в область разнообразных практических применений метода, во многом благодаря простоте и удобству его реализации. Наши исследования, напротив, были направлены на выявление и систематическое изучение физической природы явлений, связанных непосредственно с интерференцией спекл-полей [5]. При этом был обнаружен ряд новых эффектов, главным образом обусловленных спецификой распределения фазы в таких полях.



**Рис.1.** Пример искажения изображения спекл-шумом  
*Fig. 1. Example of image distortion with speckle noise*

systems. In doing so, they generate a characteristic granular structure, which is superimposed on the resulting images, becoming a source of speckle noise.

However, on the other hand, in speckle interferometry, which has become a widespread and highly effective method of optical measurements, the speckle field is purposefully used as a carrier of information on the displacement and/or shape change of the object under study.

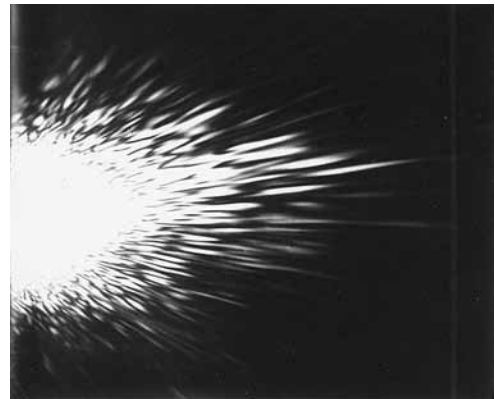
Interest in the study of the nature of speckle fields is due to two circumstances. On the one hand, there is the need of practice, since the interference of speckle fields is a physical mechanism of holographic and speckle-interferometry. Furthermore, in many practical problems of coherent optics, a superposition of the speckle field takes place, either with a smooth field or with another speckle field. On the other hand, peculiarity of the correlation properties of the speckle fields determines the appearance of many peculiar interference effects under their superposition, which determines the expediency of considering the interference of speckle fields as a full-fledged independent section of the theory of partial coherence.

After the first works in the field of applied speckle interferometry [14–16], the main attention of the researchers and engineers turned out to be paid to the field of various practical applications of the method, largely due to the simplicity and convenience of its implementation. Our research, on the contrary, was

Спекл-поле представляет собой сложное объемное распределение мелкоструктурных неоднородностей – так называемых спеклов. В пределах каждого из них фаза имеет постоянное значение и изменяется случайным образом при переходе от одного спекла к другому (рис. 2). Поскольку комплексная амплитуда в каждом индивидуальном спекле является суммой множества малых независимых вкладов от разных точек рассеивающего объекта, то к результирующему спекл- полю применима центральная предельная теорема теории вероятностей. Согласно этой теореме комплексная амплитуда результирующего спекл-поля подчиняется гауссовой статистике.

Поэтому глубина случайной пространственной модуляции амплитуды спекл-поля может достигать нуля, а флуктуации интенсивности имеют тот же порядок, что и среднее значение интенсивности. Это означает, что контраст зарегистрированной спекл-структуры, определяемый как отношение стандартного отклонения интенсивности поля к ее среднему значению, равен единице.

Характерные размеры пространственных неоднородностей спекл-поля или, как их принято называть, характерные размеры спеклов, определяются нерегулярной расходимостью рассеянного пучка



**Рис.2.** Продольная структура спекл-модулированного поля

*Fig. 2. Longitudinal structure of speckle-modulated field*

aimed at revealing and systematic study of the physical nature of phenomena directly related to the interference of speckle fields [5]. A number of new effects were discovered, mainly due to the specificity of the phase distribution in such fields.

The speckle field is a complex volumetric distribution of fine-structure inhomogeneities, the



или шириной его углового спектра  $\Delta\theta$ . Поперечный размер спеклов обычно определяют соотношением  $\sigma_{\perp} \approx \lambda/\Delta\theta$ , продольный – соотношением  $\sigma_{\parallel} \approx \lambda/\Delta\theta^2$  ( $\lambda$  – длина волны). Таким образом, при объемном рассмотрении спекл-поле представляет собой совокупность вытянутых вдоль продольной оси неоднородностей, в пределах которых фазу можно считать постоянной. Это означает, что характерный размер неоднородностей спекл-поля можно рассматривать как область его пространственной корреляции [5].

Спекл-поля, возникающие при рассеянии когерентного лазерного излучения, сами также обладают высокой степенью временной и пространственной когерентности. В этом легко убедиться, рассматривая область суперпозиции двух спекл-полей (двух реализаций спекл-поля от одного источника), имеющих детерминированный (например линейный) относительный фазовый сдвиг. Для этого, например, спекл-поля могут быть направлены в область суперпозиции под углом друг к другу. Пусть пространственная скорость изменения фазы достаточно велика, чтобы в пределах одного спекла укладывалось несколько периодов регулярной фазовой модуляции. Тогда суперпозиционное спекл-поле будет модулировано высококонтрастной интерференционной картиной во всех случаях, когда оптическая разность хода между спекл-полями не превышает длины когерентности лазерного источника. При этом контраст (видность) регулярной интерференционной картины не будет зависеть от смены реализаций спекл-поля. В частности он не меняется при суперпозиции различных участков одного и того же спекл-поля, обеспечиваемой его делением по волновому фронту (например выполненной по схеме интерферометра Юнга).

Фаза регулярной интерференционной картины постоянна в пределах каждого спекла. Существенным в таком интерференционном эксперименте является тот факт, что фаза при переходе от одного спекла к другому (как в поперечных, так и в продольных сечениях суперпозиционного спекл-поля) испытывает случайное изменение (скачок). Можно легко убедиться, что аналогичный результат будет наблюдаться также при суперпозиции спекл-поля с гладким полем, когда случайное распределение фазы в спекл-поле обуславливает случайные скачки фазы интерференционной картины. Очевидно, что при сравнительно медленном изменении относительно фазового сдвига двух неидентичных спекл-полей [5] или спекл-поля и гладкого поля, когда период регулярной (“низкочастотной”) фазовой

so-called speckles. Within each of them, the phase has a constant value and varies randomly during the transition from one speckle to another (Fig. 2). Since the complex amplitude in each individual speckle is the sum of many small independent contributions from different points of the scattering object, the central limit theorem of probability theory is applicable to the resulting speckle field. According to this theorem, the complex amplitude of the resulting speckle field obeys Gaussian statistics.

Therefore, the depth of random spatial modulation of the speckle-field amplitude can reach zero, and the intensity fluctuations have the same order as the average value of the intensity. This means that the contrast of the registered speckle structure, defined as the ratio of the standard deviation of the field intensity to its average value, is unity.

The characteristic dimensions of the spatial inhomogeneities of the speckle field, or, as they are usually called, the characteristic sizes of speckles, are determined by the irregular divergence of the scattered beam or by the width of its angular spectrum  $\Delta\theta$ . The transverse size of speckles is usually determined by the relation  $\sigma_{\perp} \approx \lambda/\Delta\theta$ , longitudinal – by the ratio  $\sigma_{\parallel} \approx \lambda/\Delta\theta^2$  ( $\lambda$  is the wavelength). Thus, with a three-dimensional view, the speckle field is a set of inhomogeneities elongated along the longitudinal axis, within which the phase can be regarded as a constant. This means that the characteristic size of the speckle field inhomogeneities can be considered as the region of its spatial correlation [5].

The speckle fields arising in the scattering of coherent laser radiation also themselves have a high degree of temporal and spatial coherence. This is easily seen by considering the superposition region of two speckle fields (two speckle field realizations from one source) having a deterministic (e.g., linear) relative phase shift. For this, e.g., the speckle fields can be directed to the superposition region at an angle to each other. Suppose that the spatial velocity of the phase change is large enough that several periods of regular phase modulation fit within the same speckle. Then the superposition speckle field will be modulated by a high contrast interference pattern in all cases when the optical path difference between the speckle fields does not exceed the coherence length of the laser source. In this case, the contrast (visibility) of the regular interference pattern will not depend on the change in the realizations of the speckle field. In particular, it does not change when superposition of different sections of the same speckle field is provided by its division along the wave front (e.g., performed by the Young interferometer scheme).



модуляции превышает характерный размер спеклов, случайные скачки фазы между фрагментами интерференционной картины с неизбежностью приводят лишь к перераспределению интенсивности в спекл-поле, но регулярной интерференционной картины при этом не наблюдается.

Особая ситуация имеет место в единственном случае, когда обеспечены условия суперпозиции спекл-полей, являющихся одной и той же реализацией спекл-поля (идентичных спекл-полей). При этом они должны быть совмещены таким образом, чтобы в некоторой пространственной области идентичные спеклы перекрывались. Речь, таким образом, идет о суперпозиции идентичных спекл-полей. Их взаимное смещение и в поперечном, и в продольном направлениях не превышает соответствующих размеров автокорреляционной функции этой реализации спекл-поля.

О редкости и особенности такой ситуации свидетельствует такой факт. Идентичные спекл-поля при взаимном смещении, превышающем объем области автокорреляции, теряют свойство взаимной корреляции и ведут себя при интерференции совершенно так же, как различные реализации спекл-полей. Однако именно эта редкая ситуация и имеет важное практическое значение, поскольку

The phase of the regular interference pattern is constant within each speckle. Essential in such an interference experiment is the fact that during the transition from one speckle to the other (both in the transverse and in the longitudinal sections of the superposition speckle field) it undergoes a random change (leap). One can easily verify that an analogous result will also be observed for a superposition of a speckle field with a smooth field, when a random phase distribution in the speckle field causes random leaps in the phase of the interference pattern. With a relatively slow change in relative phase shift of two nonidentical speckle fields or speckle field and a smooth field, the period of the regular ("low-frequency") phase modulation is more than the characteristic dimension of speckle. Therefore, random phase leaps between fragments of the interference pattern inevitably lead only to a redistribution of the intensity in the speckle field, with no regular interference pattern observed [5].

A special situation occurs in the only case when conditions for the superposition of speckle fields, which are one and the same realization of the speckle field (identical speckle fields), are provided. In this case, they must be combined so that in a certain spatial region identical speckles overlap. This, then, is a superposition



на ее реализации базируется вся совокупность методов голографической и спекл-интерферометрии. Следует отметить, что на начальном этапе применения методов спекл-интерферометрии бытовало мнение, что в основе так называемых методов спекл-фотографии (этот термин широко использовался в литературе и лишь позднее был "вытеснен" понятием спекл-интерферометрия) лежит некий специфический механизм, не связанный с принципом голографии. Однако дальнейшие исследования [17] позволили установить, что в основе и голографической, и спекл-интерферометрии лежит общий механизм интерференции идентичных спекл-полей

Принципиальная особенность интерференции идентичных спекл-полей, как уже отмечалось, состоит в том, что фаза регулярной интерференционной картины остается постоянной в пределах области наложения идентичных спеклов в любом сечении суперпозиционного спекл-поля. Очевидно, что при этом возможность наблюдения регулярной интерференционной картины не зависит от соотношения характерного размера спеклов и периода регулярной модуляции.

Поэтому именно в этом и только в этом случае может наблюдаться "низкочастотная" интерференционная картина с периодом, превышающим характерный поперечный размер спеклов. Получение и дальнейший анализ таких интерференционных картин и составляет задачу голографической и спекл-интерферометрии.

Итак, имеется три основных разновидности интерференции с участием спекл-полей:

- спекл-поле с гладким полем;
- некоррелированные (неидентичные) спекл-поля;
- коррелированные (идентичные) спекл-поля.

Все эти ситуации достаточно часто реализуются на практике. Так, интерференция спекл-поля с гладким полем типична для регистрации голограмм диффузно рассеивающих или диффузно подсвечиваемых объектов [3,5]. Интерференция некоррелированных спекл-полей имеет место при голографической регистрации объектов с использованием опорных волн произвольной формы [8,11,33]. Наконец, явление интерференции коррелированных (идентичных) спекл-полей лежит в основе голографической и спекл-интерферометрии [5].

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКЛОВ**

Со временем физическая общность голографической и спекл-интерферометрии, на которую мы

of identical speckle fields. Their mutual displacement in both the transverse and longitudinal directions does not exceed the corresponding sizes of the autocorrelation function of this realization of the speckle field.

The fact that in a mutual displacement exceeding the volume of the autocorrelation region, the identical speckle fields lose the property of mutual correlation and behave with interference in the same way as the different realizations of speckle fields, evidences the rarity and peculiarity of such situation. However, it is this rare situation that is of great practical importance, since all the methods of holographic and speckle-interferometry are based on its implementation. It should be noted that at the initial stage of the application of speckle interferometry methods there was an opinion that the so-called speckle-photography methods (this term was widely used in the literature and was later "replaced" by the concept of speckle interferometry) is based on a specific mechanism that is not connected with the principle of holography. However, further studies [17] made it possible to establish that both holographic and speckle interferometry are based on a common mechanism of interference of identical speckle fields

A fundamental feature of the interference of identical speckle fields consists in the fact that the phase of the regular interference pattern remains constant within the region of overlap of identical speckles in any section of the superposition speckle field. It is obvious that in this case the possibility of observing a regular interference pattern does not depend on the ratio of the characteristic speckle size and the period of regular modulation.

Therefore, it is in this and only in this case that a "low-frequency" interference pattern with a period exceeding the characteristic transverse size of the speckles can be observed. Obtaining and further analysis of such interference patterns is the task of holographic and speckle interferometry.

Thus, there are three main types of interference involving speckle fields:

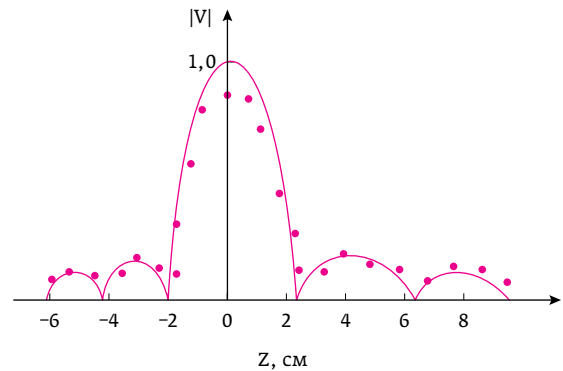
- a speckle field with a smooth field;
- uncorrelated (non-identical) speckle fields;
- correlated (identical) speckle fields.

All these situations are often implemented in practice. Thus, the interference of a speckle field with a smooth field is typical for recording holograms of diffusely scattering or diffusely illuminated objects [3, 5]. Interference of uncorrelated speckle fields occurs in holographic recording of objects using reference waves of arbitrary shape [5, 8, 11]. Finally, the phenomenon of interference of correlated (identical) speckle fields underlies holographic and speckle interferometry.

указывали в работах [5, 17], стала очевидной. Они представляют собой два родственных средства обеспечения интерференции идентичных спекл-полей. В обоих случаях сигналом измерительной информации является модулированная спеклами низкочастотная интерферограмма. Она возникает в области суперпозиции, как правило, двух идентичных спекл-полей при условии, что период этой интерферограммы превышает характерный размер спеклов.

Здесь необходимо подчеркнуть, что при получении и интерпретации таких интерферограмм важную роль играет учет закономерностей локализации интерференционных полос. Эффект локализации полос непосредственно связан с величиной объема когерентности и состоит в образовании в зоне суперпозиции ограниченной области, в которой видность интерференционных полос имеет максимальную величину. Это явление хорошо известно в классической интерферометрии с протяженными тепловыми источниками, дающими излучение с существенно ограниченной пространственной когерентностью.

При использовании лазерного излучения в случае суперпозиции гладких пучков область локализации полос, как правило, занимает всю зону



**Рис.3.** Асимметрия кривой функции видности спекл-интерферограммы поперечного сдвига, обусловленная линейным изменением поперечных размеров спеклов (непрерывная линия – теоретические расчеты, точки – экспериментальные результаты)

*Fig. 3. Asymmetry curve of the visibility function of longitudinal shear speckle interferogram caused by linear variation of transverse speckle sizes (continuous line – theoretical calculations, dots – experimental results)*

## INTERACTION OF SPECKLE-FIELDS AND SPECKLE FINE STRUCTURE

Over time, the physical unity of holographic and speckle

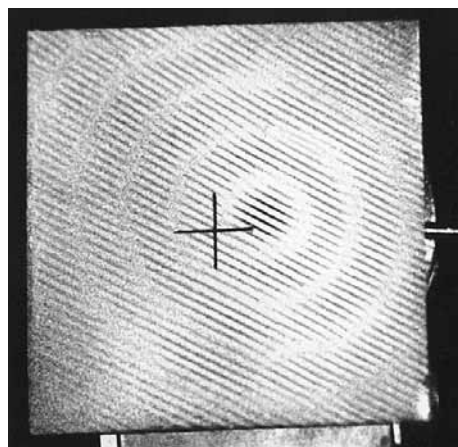


суперпозиции и ограничивается только длиной когерентности источника. Что же касается методов голографической и спекл-интерферометрии, в которых обеспечивается суперпозиция идентичных спекл-полей, имеющих ограниченную область пространственной корреляции, то для них явление локализации полос столь же типично, как и для интерферометрии с протяженными тепловыми источниками. Однако следует отметить, что при исследовании явления локализации полос в случае интерференции спекл-полей [5] принятый в классической интерферометрии подход, основанный на геометрической теории локализации, не дает достаточно полного и физически адекватного описания распределения видности интерференционных полос.

Поэтому в наших работах существенное внимание уделялось развитию нового подхода к объяснению закономерностей локализации и распределения видности интерференционных полос при суперпозиции спекл-полей, основанного на выявлении роли спеклов как областей корреляции полей: их размеров, формы и тонкой структуры. В рамках реализации этого подхода был обнаружен ряд ранее неизвестных эффектов, обусловленных тонкой структурой спекл-полей, которая, как правило, не проявляется при непосредственном наблюдении, но оказывает существенное влияние на результаты экспериментов. На рис. 3 отчетливо наблюдается асимметрия кривой видности в области локализации интерференционных полос, обусловленная линейным увеличением поперечных размеров спеклов по мере удаления от плоскости спеклограммы.

Практическое использование этих эффектов вкуче с исследованием изображающих свойств спеклограмм [5, 17] позволило разработать оригинальные методы интерференционных оптических измерений [5], а также развить интересное направление оптической обработки информации – вычитание изображений [17].

В первом приближении спекл-поле можно считать сложной интерференционной структурой с нерегулярным распределением амплитуды и фазы, обусловленным случайно изменяющейся разностью фаз между когерентно взаимодействующими составляющими поля. При этом элементы спекл-структуры выглядят как пятна с однородным распределением амплитуды, в пределах каждого из которых фаза имеет детерминированное значение. Между тем дифракционное изображение точечного когерентного источника обладает, как известно, тонкой структурой, обусловленной



**Рис.4.** Результат когерентной суперпозиции двух вращательно сдвинутых спекл-полей на спекл-интерферограмме, полученной с кольцевой апертурой  
**Fig. 4.** Result of the coherent superposition of two rotationally shifted speckle fields in the speckle interference pattern produced with an annular aperture

интерферометрии, which we specified in [5, 17], became obvious. They are two related means of providing interference of identical speckle fields. In both cases, the signal of the measurement information is the low-frequency interferogram modulated by speckles, formed in the superposition region, as a rule, of two identical speckle fields under conditions when the period of this interferogram exceeds the speckle's characteristic size.

Here it is necessary to emphasize that when receiving and interpreting such interferograms, an important role is played by taking into account the regularities of the localization of interference fringes. The effect of the localization of the fringes is directly related to the magnitude of the coherence volume and consists in the formation in the superposition zone of a limited region where the visibility of the interference fringes has a maximum value. This phenomenon is well known in classical interferometry with extended thermal sources giving radiation with essentially limited spatial coherence.

When laser radiation is used in the case of superposition of smooth beams, the fringe localization region, as a rule, occupies the entire superposition zone and is limited only by the coherence length of the source. As for the methods of holographic and speckle interferometry, when a superposition of identical speckle fields having a limited region of spatial correlation is provided, the phenomenon of localization of fringes is as typical

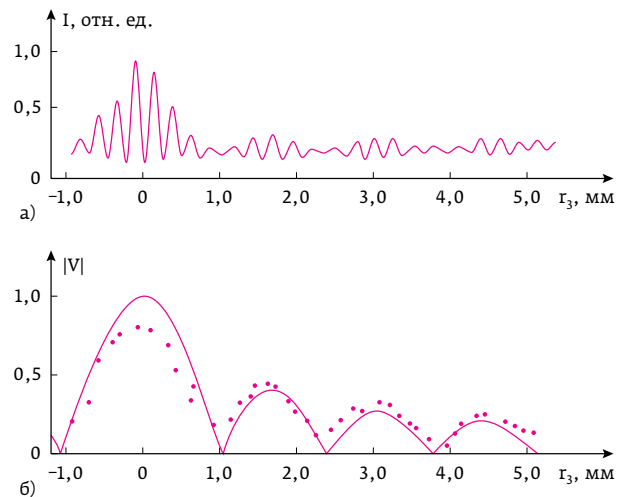
наличием вторичных максимумов амплитуды и изменением знака фазы при переходе от одного такого максимума к другому.

В экспериментах, направленных на обнаружение тонкой поперечной структуры спеклов [5], использовались наблюдательные системы с входными зрачками различной формы и размера, определявшими соответственно размеры и форму спеклов. Вариация степени взаимного смещения спеклов обеспечивалась вращательным сдвигом рассеивающей поверхности между двумя экспозициями. Как и ожидалось, увеличение относительного размера апертуры приводило к уменьшению области, в которой контраст голографических и спекл-интерферограмм вращательного сдвига был близок к единице. Однако кроме того вполне отчетливо наблюдались осцилляции видности интерференционных полос по мере удаления от центра вращения. Естественно, при использовании круглой апертуры видность во вторичных максимумах была существенно меньше, чем в главном. При этом наблюдался поперечный сдвиг полос на половину периода при переходе от одного максимума к соседнему, что соответствует изменению знака фазы.

Отметим, что на наличие таких осцилляций видности обращали внимание некоторые авторы. Однако природа явления оставалась невыясненной. Дело в том, что при использовании круглой апертуры не удается обнаружить более одного вторичного максимума функции Бесселя первого рода первого порядка в силу существенного падения видности в последующих вторичных максимумах осциллирующей интерферограммы (рис. 4).

Между тем, гипотезу относительно природы этого эффекта удалось убедительно подтвердить, используя апертуры более сложной формы, формирующие существенно более интенсивные вторичные максимумы. В частности в работах [5, 17] мы использовали апертуры в виде кольца и двух или нескольких отверстий различной формы, что позволило не только продемонстрировать многочисленные вторичные максимумы, но и измерить распределение видности в них. Результаты измерений показали хорошее согласие с теоретическими и расчетными данными. На рис. 4 отчетливо наблюдаются осцилляции видности интерференционных полос, а также их сбой на полпериода при переходе через области нулевой видности. Распределение видности и эффект сбоя фазы интерференционных полос иллюстрирует рис. 5.

Детальное исследование эффектов осцилляций видности и локализации интерференцион-



**Рис.5.** Распределение функции видности  $V = f(r)$  в спекл-интерферограмме (рис. 4): а) – зависимость интенсивности полос от величины смещения; б) – распределения видности полос (непрерывная линия – теоретические расчеты, точки – экспериментальные результаты)

**Fig. 5.** Distribution of the visibility function  $V = f(r)$  in the speckle interference pattern (Fig.4): а) – dependence of the intensity of fringes on the displacement; б) – distribution of the visibility fringes (continuous line – theoretical calculations, dots – experiment results)

as for interferometry with extended thermal sources. However, it should be noted that the approach adopted in classical interferometry and based on the geometric theory of localization does not give a sufficiently complete and physically adequate description of the distribution of the visibility of interference fringes when studying the phenomenon of fringe localization in the case of interference of speckle fields [5].

Therefore, in our works, considerable attention has been paid to the development of a new approach to explaining the regularities of localization and distribution of the visibility of interference fringes during superposition of speckle fields, based on the identification of the role of speckles as areas of correlation of fields: their size, shape, and fine structure. Within the framework of this approach, a number of previously unknown effects were discovered due to the fine structure of the speckle fields, which, as a rule, does not manifest itself in direct observation, but has a significant effect on the results of the experiments. Fig. 3 clearly shows the asymmetry of the visibility curve in the region of interference fringe localization caused by a linear increase in the transverse dimensions of the speckles as they move away from the plane of the specklegram.



ных полос в суперпозиционных спекл-полях было выполнено нами в [5]. В этих работах было показано, что для наблюдения интерферограммы необходимо, чтобы величина взаимного смещения спеклов при их регистрации не разрешалась наблюдательной оптической системой и не превышала объема пространственной когерентности излучения, используемого для получения как голографических, так и спекл-интерферограмм. При этом выяснилось, что область локализации полос, как правило, находится вне плоскости спеклограммы.

Интересным следствием существования тонкой структуры спеклов стало обнаружение эффекта ветвления интерференционных полос в области их локализации [5]. При этом удалось установить связь между точками ветвления и нулями амплитуды комплексной функции видности. Установленная зависимость позволяла определять пространственное расположение таких точек и степень их локализации. Следует отметить, что эффект ветвления интерференционных полос наблюдается как в поперечном, так и в продольном сечениях суперпозиционных спекл-полей. Ветвящиеся интерференционные полосы можно наблюдать при различных видах взаимного смещения идентичных спекл-полей, а также при суперпозиции неидентичных спекл-полей.

Как выяснилось, при использовании пространственно модулированных опорных волн в голографической интерферометрии наличие в спекл-полях точек с нулевой интенсивностью (так называемых дислокаций спекл-поля) обуславливает искажение микроструктуры восстановленного (вторичного) спекл-поля даже при использовании восстанавливающей волны, идентичной опорной. В результате имеет место неполная корреляция интерферирующих спекл-полей, что сказывается в определенном падении видности регулярных интерферограмм.

К не менее интересным результатам привело исследование продольной тонкой структуры спеклов. Оказалось [5], что при регистрации спеклограмм в фурье-плоскости продольное поступательное смещение объекта приводит только к радиальному смещению спеклов, что обеспечивает выполнение условия идентичности регистрируемых спекл-полей. Поэтому в поле, рассеянном такой спеклограммой, имеет место суперпозиция идентичных вторичных спеклов, вследствие чего получаемые спекл-интерферограммы характеризуются высоким контрастом.

The practical use of these effects, coupled with the study of the imaging properties of the spectrograms, [5, 17] made it possible to develop original methods for interference optical measurements [5], and to develop an interesting direction of optical information processing, i. e. image subtraction [17].

In the first approximation, the speckle field can be considered as a complex interference structure with an irregular distribution of amplitude and phase due to a randomly varying phase difference between the coherently interacting field components. In this case, the elements of the speckle structure look like spots with a uniform amplitude distribution, within each of which the phase has a deterministic value. Meanwhile, diffraction image of the point source has a coherent, as is known, the fine structure due to the presence of secondary maxima of the amplitude and sign of the phase change at the transition from one to another of such maximum.

In the experiments aimed at detecting fine transverse speckle patterns [5], supervisory system with the entrance pupil of different shapes and sizes were used defining speckle size and shape, respectively. The variation of degree of mutual speckle displacement provides a rotational shift of the scattering surface between the two exposures. As expected, the increase in the relative aperture size resulted in a decrease in the area where the contrast of the speckle and holographic interferogram of the rotational shear was close to unity. However, in addition the oscillations of the visibility of the interference fringes as the distance from the center of rotation were clearly observed. Naturally, when using a circular aperture, the visibility in secondary maxima was significantly lower than in the main one. Thus, transverse shear of fringes by half a period was observed in the transition from one maximum to another, which corresponds to a phase sign change.

Note that the presence of such visibility oscillations drawn attention of several authors. However, the nature of the phenomenon remains unclear. The fact is that when using the circular aperture, it was not possible to detect more than one Bessel function secondary maximum of the first kind of first order due to substantial visibility drop in subsequent secondary maxima of the oscillating interferogram (Fig. 4).

Meanwhile, the hypothesis about the nature of this effect was convincingly confirmed using more complex aperture shapes, forming much more intensive secondary maxima. In particular, in [5, 17], we used a ring aperture and two or more holes of different shapes, allowing not only to demonstrate numerous secondary maxima, but also to measure the distribution of the visibility. The measurement results showed good



Однако наибольший интерес в этой части исследований, на наш взгляд, представляет подтверждение гипотезы о наличии у спекл-полей продольной тонкой структуры. Впервые проявление такой структуры было целенаправленно обнаружено и подробно исследовано в работах, которые можно найти в обзоре [5]. Действительно, продольная автокорреляционная функция спекл-поля характеризуется наличием вторичных максимумов, относительная величина которых определяется параметрами апертуры, формирующей структуру спекл-поля.

Продольное смещение диффузно рассеивающего объекта приводит к дополнительному радиально-симметричному поперечному смещению спеклов, или, что то же самое, к смещению максимума кросс-корреляционной функции, а также к изменению ее характерного вида по отношению к виду автокорреляционной функции. Величина этого смещения линейно нарастает к периферии спеклограммы, что и определяет указанное изменение. Поэтому по мере увеличения продольного взаимного смещения спекл-полей функция кросс-корреляции вначале ожидаемо уменьшается, но затем следует ее существенный рост, поскольку себя проявляют вторичные максимумы продольно

agreement with the theoretical and calculated data. Fig. 4 clearly shows the oscillation curve of the visibility of interference fringes, and their failure by a half period when passing through the region of zero value of the visibility function. The distribution of the values the visibility function and the effect of the interference fringes dephasing is shown in Fig.5.

A detailed study of the visibility of the oscillation effects and localization of the interference fringes in the superimposed speckle fields was carried out in [5]. In these studies, it was shown that for observing the interferogram it was necessary that the magnitude of the relative speckle displacement when recording is not resolved by the observation optical system and does not exceed the volume of the spatial coherence of the radiation used to obtain both holographic and speckle interferograms. It was found that the region of localization of the fringes are usually located outside the specklegram plane.

An interesting consequence of the speckle fine structure was the discovery of the effect of interference fringes branching in the region of their localization [5]. It was possible to establish a link between the branch points and the zero points of the visibility complex amplitude function, which allows to determine the spatial location of these points and





сдвигаемых идентичных спеклов. Эксперименты по получению спекл-интерферограмм продольного смещения с объемной регистрацией спекл-полей подтвердили такой характер пространственной ориентации спеклов в объеме спекл-поля.

Обстоятельное исследование продольной тонкой структуры спеклов подтвердило тот факт, что при интерференции продольно идентичных смещенных спекл-полей наблюдаются периодические изменения положения и величины максимумов кросс-корреляционной функции, обусловленные наличием вторичных максимумов продольной функции автокорреляции. В результате закономерным образом в зависимости от величины взаимного смещения спекл-полей изменяется функция видности спекл-интерферограмм. Причем при определенных значениях величины этого смещения наблюдаются характерные сдвиги фазы видности интерференционных полос. Это происходит из-за пространственного наложения различных максимумов тонкой структуры идентичных спеклов.

Следует отметить, что исследование фазовых характеристик спекл-полей имеет немаловажное значение, поскольку, оставаясь скрытыми при непосредственном наблюдении как самих спекл-полей, так и результатов их интерференции, они самым существенным образом влияют на результаты наблюдения.

В частности, вопреки представлению о том, что фаза развитого спекл-поля есть случайная величина, равномерно распределенная по пространству, нами показано [17], что для симметричных апертур, используемых в качестве источников спекл-полей, разность фаз в соседних спеклах имеет отчетливо неравномерную плотность вероятности. Это обстоятельство также не следует упускать из вида при работе со спекл-полями

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В силу широкого применения лазеров в самых разнообразных областях науки, техники и технологий широкий круг специалистов будет неизменно сталкиваться с проявлением спекл-эффекта и явлений, связанных с суперпозицией и интерференцией спекл-полей. Природу и закономерности таких явлений, безусловно, необходимо учитывать при интерпретации результатов многих прикладных исследований. Более того, по мере внедрения цифровых методов в область когерентной оптики появляются новые возможности, связанные с развитием цифровой голографической и спекл-интерферометрии [18-19]. Компьютерный оптический эксперимент с записью и рекон-

their degree of localization. It should be noted that the effect of the interference fringes branching is observed in both transverse and longitudinal sections of the superimposed speckle fields. Branching fringes can be observed in different types of mutual displacement of identical speckle fields, as well as non-identical superposition of speckle fields.

As it turned out, by using spatially modulated reference waves in holographic interferometry, the presence of points with zero intensity in the speckle fields (so-called dislocation speckle fields) causes a distortion of the reconstructed microstructure (secondary) speckle field even with the use of the reconstructing wave, identical to a reference one. As a result, there is a partial correlation of the interfering speckle fields, which in particular affects the visibility incidence of regular interference patterns.

No less interesting results were obtained in the study of the fine structure of the longitudinal speckles [5]. It was found that when registering specklegram in the Fourier plane, the longitudinal translational displacement of the object results in only radial displacement of speckles that provides the identity conditions of the recorded speckle fields. Therefore, in the field scattered by a specklegram a superposition of identical secondary speckles occurs, thereby the obtained speckle interferograms have high contrast.

However, the greatest interest in this part of the research, in our opinion, is a confirmation of the hypothesis about the presence of longitudinal fine structure of the speckle fields. First manifestation of such a structure was specifically found and studied in detail in works which can be found in the review [5]. Indeed, the longitudinal autocorrelation function of the speckle field is characterized by the presence of secondary maxima, which relative magnitude is determined by of the parameters of the aperture forming speckle field structure.

Longitudinal displacement of a diffusely scattering object leads to additional radially-symmetrical lateral displacement of speckles, or similarly, to the displacement of the maximum cross-correlation function, and also to change its characteristic appearance with respect to the form of the autocorrelation function. The magnitude of this displacement increases linearly to the specklegram periphery that determines the said change. Therefore, with increasing mutual longitudinal displacement of speckle fields, the cross-correlation function decreases initially as expected, but then it significantly increases, as secondary maxima of the identical longitudinal displacing speckles manifest themselves. The experiments to obtain speckle interferograms of longitudinal displacement with a





струкцией рассеянного объектом светового поля, открывая интересные новые аспекты исследования явления интерференции, не меняет основной механизм взаимодействия спекл-полей. Поэтому результаты цикла исследований, представленные в кратком обзоре, будут сохранять свою актуальность и в современных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Gabor D.** – Proc. Roy. Soc., 1949, v. A197, p.454.
2. **Денисюк Ю. Н.** – ДАН СССР, 1962, т.144, с.1275.
3. **Leith E. N., Upatnieks J. J.** – Opt. Soc. Am., 1964, v.54, p.1295.
4. **Клименко И. С., Скроцкий Г. В.** Голография сфокусированных изображений. – УФН, 1973, т.109, вып.2, с.269–292.
5. **Клименко И. С.** Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. – М.: Наука, 1985.
6. **Brandt G. V.** – Appl. Opt., 1969, v.5, p.1421.
7. **Клименко И. С., Матинян Е. Г.** О некоторых особенностях голограмм сфокусированных изображений, – Оптика и спектроскопия, 1970, т.28, вып.3, с.556–560.
8. **Клименко И. С., Матинян Е. Г.** Об использовании опорной волны произвольной формы при голографировании сфокусированных изображений. – Оптика и спектроскопия, 1970, т.29, вып.6, с.1132–1137.
9. **Клименко И. С., Матинян Е. Г.** Получение голографических интерферограмм сфокусированных изображений с локальным опорным пучком. – Квантовая электроника, 1974, т.1, вып.9, с.2094–2096.
10. **Аристов В. В., Иванова Г. А., Клименко И. С., Матинян Е. Г.** Голографическая регистрация без опорного пучка предметов, смещающихся во время экспозиции. – Квантовая электроника, 1976, т.3, вып.2, с.436–438.
11. **Клименко И. С., Матинян Е. Г.** Голографическая регистрация сфокусированных изображений с использованием в качестве опорной волны части рассеянного объектом излучения. – Оптика и спектроскопия, 1971, т.31, вып.5, с.776–778.
12. **Клименко И. С., Матинян Е. Г., Скроцкий Г. В.** О природе квазиосевых реконструкций, формируемых "безопорными" голограммами сфокусированных изображений. – Доклады АН СССР, 1973, т.211, вып.3, с.571–573.
13. **Клименко И. С., Скроцкий Г. В.** Сфокусированные голограммы интенсивности без опорного пучка – Материалы VI Всесоюзной школы по голографии – Л.: ЛИЯФ, 1974, с.355–368.
14. **Leendertz J. A.** – J. Scient. Instrum. (J. Phys. E), 1970, v.3, p.214.
15. **Archbold E., Burch J. M., Ennos A. E.** – Opt. Acta, 1970, v.17, p.883.
16. **Archbold E., Ennos A. E.** – Opt. Acta. 1972, v.19, p.253.
17. **Ryabukho V. P., Klimenko I. S., Golubentseva L. I.** Interference of laser speckle fields. – Proc. SPIE "New Techniques and Analysis in Optics" 1994, v.2340, p.513–522.
18. **Мысина Н. Ю., Максимова Л. А., Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П.** Пространственные корреляции и плотность распределения вероятности разности фаз развитого спекл-подполя: численный и натурный эксперименты. – Квантовая электроника, 2015, т. 45, № 10, с.979–988.
19. **Максимова Л. А., Рябухо П. В., Мысина Н. Ю., Рябухо В. П.** Определение субпиксельных микросмещений спекл-структуры методом фазового сдвига поля пространственного спектра. – ЖТФ, 2017, т. 87, № 8, с. 1271–275.

volumetric registration of speckle fields fully confirmed the character of spatial orientation of speckles in the speckle field volume.

A thorough study of speckle longitudinal fine structure confirmed the fact that when the interference of identical longitudinally displaced speckle fields occurs, periodic change in the position and magnitude of maxima of cross-correlation function is observed due to the presence of secondary maxima longitudinal autocorrelation function. As a result, depending on the mutual displacement of speckle fields, the visibility of speckle interferograms changes in a predictable manner, wherein with definite values of the magnitude of this displacement, because of the spatial superposition of different maxima of the identical speckles fine structure, the characteristic dephasing of the visibility of interference fringes is observed.

It should be noted that the study of the phase characteristics of speckle fields is of great importance because, while remaining concealed at both the direct observation of speckle fields and the results of the interference, they have the most significant influence on the result of observation.

In particular, contrary to the concept that the phase of the developed speckle field is a random variable uniformly distributed in space, we have shown [17] that for symmetric apertures, used as sources of speckle fields, the phase difference in neighboring speckles has distinctly irregular probability density. This fact should also not be ignored when working with speckle fields.

## CONCLUSION

Because of the wide application of lasers in various fields of science, engineering and technology, a wide range of professionals will always face the manifestation of the speckle effect and the phenomena associated with the superposition and interference of the speckle fields. The nature and regularity of such events, of course, should be taken into account when interpreting the results of many applied research. Moreover, as the digital techniques are introduced to coherent optics, new opportunities associated with the development of holographic and digital speckle pattern interferometry emerge (see, e.g., [18.– 19]). Computer optical experiment with the recording and reconstruction of the scattered object light field, opening interesting new aspects of research of the phenomenon of interference, nonetheless, does not change the basic mechanism of interaction of speckle fields, therefore it can be assumed that the results of research cycle, an overview of which is set out in this paper, will remain relevant in the modern world.